

国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展

张克强, 杜连柱, 社会英, 沈仕洲

引用本文:

张克强, 杜连柱, 社会英, 等. 国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2472-2481.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

天津市家庭养殖环境中抗生素污染特征与风险评估

阮蓉, 张克强, 杜连柱, 丁工尧, 王素英, 支苏丽

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 202-210 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0694>

施用粪肥对农田土壤磷素累积和饱和度增加速率的影响

严正娟, 陈硕, 周怀平, 杨振兴, 陈清

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1110-1118 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.013>

施用粪肥和沼液对设施菜田土壤磷素累积与迁移的影响

王敏锋, 严正娟, 陈硕, 高杰云, 李吉进, 许俊香, 陈清

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1351-1359 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.018>

生物炭和猪粪肥对铜污染土壤中莴菜生长及铜形态的影响

陈璇, 郭雄飞, 陈桂葵, 黎华寿, 贺鸿志

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 913-918 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.014>

我国畜禽养殖氨排放特征及减排体系构建研究

王文林, 杜薇, 韩宇捷, 曹秉帅, 李文静, 童仪, 戴钰蕴, 刘波

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2305-2316 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1098>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张克强, 杜连柱, 社会英, 等. 国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2472–2481.

ZHANG K Q, DU L Z, DU H Y, et al. Application of livestock and poultry waste to agricultural land: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2472–2481.



开放科学 OSID

国内外畜禽养殖粪肥还田利用研究进展

张克强^{1,2}, 杜连柱¹, 社会英¹, 沈仕洲^{1,2}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 云南大理农田生态系统国家野外观测研究站, 云南 大理 671004)

摘要: 养殖粪肥还田利用是解决畜禽养殖污染问题的根本出路, 也是破解农业面源污染难题、践行绿色发展理念的重要举措。本文以固体粪肥和液体粪肥为主要研究对象, 在充分查阅国内外文献的基础上, 介绍了粪肥分类、标准及粪肥农田利用主要技术, 重点分析了粪肥还田对农田土壤中有机质、氮、磷含量影响及抗生素、抗性基因污染水平, 概述了固体粪肥和液体粪肥还田的主要机械设备, 并针对粪肥还田技术创新、监测体系、环境与安全风险和还田补贴等提出了具体建议。

关键词: 畜禽养殖; 粪肥; 农田利用; 重金属; 抗生素

中图分类号: S141.4; X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)11-2472-10 doi:10.11654/jaes.2021-1031

Application of livestock and poultry waste to agricultural land: A review

ZHANG Keqiang^{1,2}, DU Lianzhu¹, DU Huiying¹, SHEN Shizhou^{1,2}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Dali, Yunnan, Agro-Ecosystem, National Observation and Research Station, Dali 671004, China)

Abstract: Returning breeding manure to agricultural land is a method that can solve the problems of livestock and poultry breeding pollution and agricultural non-point source pollution and practice green development. This paper focused on the utilization of livestock and poultry breeding waste on farmland and reviewed the research progress of returning livestock manure to the field by consulting internal and external documents. This paper analyzed the impact of manure application to farmland on the organic matter, nitrogen, and phosphorus contents and the pollution of antibiotics and level of resistance genes in the soil. The main mechanical equipment used for the return of solid and liquid manure to the field was also summarized. Specific suggestions regarding technical innovations, monitoring systems, environmental and safety risks, and subsidies for returning manure to farmland were provided.

Keywords: livestock and poultry breeding; manure; farmland utilization; heavy metal; antibiotic

我国有几千年的农耕文明, 自古就有使用有机肥更新地力的传统, 积累了大量有机肥积制和施用的经验^[1]。但是, 随着畜禽规模化养殖的快速发展, 粪污

量大且集中, 受季节、施用不便等因素制约, 农业生产中内部物质能量循环流动的链条中断, 粪污由资源变成了污染源^[2]。畜禽粪污处理利用引起了社会及学

收稿日期: 2021-09-06 录用日期: 2021-09-10

作者简介: 张克强(1968—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 研究员, 主要从事畜禽废弃物资源化利用研究。E-mail: keqiangzhang68@163.com

基金项目: 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关计划项目(2019AB028); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800100); 中国农业科学院科技创新工程

Project supported: The Key Technology Research and Development Program in Key Areas of Xinjiang Production and Construction Crops (2019AB028);

The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800100); Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences

者们的广泛关注。

近年来,国家高度重视养殖粪污资源化利用工作,国务院办公厅印发了《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(国办发〔2017〕48号),提出全面推进畜禽养殖废弃物资源化利用,加快构建种养结合、农牧循环的可持续发展新格局,为推进畜禽粪肥还田利用提供了根本遵循和目标要求^[3]。农业农村部出台了《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》(农办牧〔2018〕1号),指导各地加快推进畜禽粪污资源化利用,促进农牧结合、种养循环农业发展^[4],并与生态环境部联合出台《关于促进畜禽粪污还田利用依法加强养殖污染治理的指导意见》(农办牧〔2019〕84号)和《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》(农办牧〔2020〕23号),指出到2025年,畜禽粪污综合利用率达到80%,要把畜禽粪肥作为替代化肥的重要肥料来源,着力扩大堆肥、液态粪肥利用,同时明确还田利用标准规范,强化粪污还田利用过程监管^[5]。

本文在分析粪肥分类和标准的基础上,梳理了粪肥还田技术、设备与装备,深入探讨了国内外粪肥污染物控制技术及其粪肥还田对环境的影响,以期为指导我国养殖粪肥还田和种养结合绿色发展提供决策参考。

1 粪肥分类及标准

目前,养殖粪污资源化利用的主要方式包括肥料化、能源化、饲料化、基质化,其中肥料化利用是重要方向之一^[6]。本文的粪肥是指以畜禽粪污为主要原料,通过无害化处理,充分杀灭病原菌、虫卵和杂草种子后作为肥料还田利用的堆肥、商品有机肥、沼渣、粪水和沼液等,可分为固体粪肥和液体粪肥,固体粪肥一般包括堆肥和商品有机肥等,液体粪肥主要指粪水和沼液(表1)。

堆肥是以堆沤腐解的方式将养殖废弃物进行腐熟,是数千年来我国农民传统的提高土壤肥力的重要

手段^[7];商品有机肥是以畜禽粪便、秸秆等废弃物为主要原料,通过添加促进发酵的微生物菌剂,经过工厂化发酵腐熟、造粒等一系列工艺后制成的肥料^[8]。沼液和沼渣是养殖粪污经厌氧发酵、固液分离后的液态和固态产物,肥效相对稳定;肥水指经无害化过程处理后达到还田质量要求的养殖粪水,粪水为养殖过程中产生的尿液、全部或部分粪便、散落饲料及冲洗水混合而成的液体。

2 粪肥还田技术

粪肥还田利用将养分带回土壤,能够培肥土壤,改良地力,解决“用地养地”矛盾,减轻环境压力。2017年农业农村部印发《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)》,集成创建了资源化利用7种典型技术模式^[9],其中还田技术包括粪污全量收集还田利用、固体粪便堆肥利用、污水肥料化利用等,可分为固体粪肥还田利用和液体粪肥还田利用技术。

2.1 固体粪肥还田利用技术

欧美发达国家采用粪肥定量施用的原则,基于养分平衡指导粪肥还田利用^[10]。欧盟的硝酸盐法案规定,在硝酸盐敏感区粪肥施用的最大量为 $170\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (以氮计),该限值迫使养殖场将多余的粪便运输到其他的农场并加以利用^[11]。粪肥在地表的时间越长,氨挥发量越大,将粪肥与表层土壤混合可有效降低养分的损失。深施有利于减少氨的挥发和径流损失,固体粪肥撒施后翻耕、条施后覆土能有效抑制 NH_3 挥发和 N_2O 的排放损失^[12]。养分的损失还与季节有关,冬末或初春施肥有利于减少养分损失,从而增加作物对养分的吸收^[13]。

多年来,随着我国化肥工业的发展,农田化肥用量迅速增长,固体粪肥用量锐减。近年来国家高度重视养殖粪污资源化利用,固体粪肥利用技术的研究和推广不断深入。如众多学者对有机肥施用于稻麦轮作系统^[14]、不同粪肥施用于双季稻^[15]、猪粪有机肥施

表1 粪肥分类和标准

Table 1 Classification and standard of livestock and poultry waste

类型 Type	主要组成 Component	执行标准 Standard
固体粪肥	堆肥	畜禽粪便、废垫料
		《畜禽粪便堆肥技术规范》(NY/T 3442—2019);《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)
	商品有机肥	畜禽粪便、废垫料、农业秸秆
	沼渣	粪便厌氧消化固液分离后固体
		《有机肥料》(NY/T 525—2021);《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)
		《沼肥》(NY/T 2596—2014);《畜禽粪便还田技术规范》(GB/T 25246—2010)
液体粪肥	粪水	全部或部分粪便、尿液、外漏饮水以及冲洗水
	沼液	粪便厌氧消化固液分离后液体
		《畜禽粪水还田技术规程》(已立项)
		《沼肥》(NY/T 2596—2014)

用于玉米^[16]、鸡粪堆肥施用于小白菜^[17]等进行研究,均证实固体粪肥能够替代部分化肥,且具有增产作用,但这些研究多集中在粪肥施用量的影响,对施用方式、季节等的研究关注较少。

2.2 液体粪肥还田利用技术

国外液体粪肥还田利用技术比较成熟,粪水有足够的贮存设施,配套专业化的搅拌设备、施肥机械、施用管网等。在施用方式上可分为表层撒施、条施、浅层注射、深层注射、喷灌等^[18-19]。有研究表明,牛场粪水施用于牧草,能够增加牧草产量和品质^[20-21],与施用化肥相比,施用奶牛场粪水显著增加了牧草土壤中无机氮和有效钾的含量^[22]。还有学者对液体粪肥长期施用对土壤碳、氮、磷的变化进行了研究^[23-24]。

我国液体粪肥主要指经固液分离后且存储一定时间的养殖废水和粪污沼气发酵后的沼液。相比于固体粪肥,液体粪肥产生量大、养分差异明显、还田难度高,目前研究主要集中在施用后对土壤及作物产量等的影响。如XU等^[25]的研究表明,施用沼液可提高土壤的养分,增加土壤pH值并促进土壤团粒结构的形成,从而改良土壤。DU等^[26]的研究证实,适量牛场沼液连续3 a施用于华北平原小麦-玉米轮作农田,能够保证作物产量,同时避免土壤硝态氮的淋溶。目前,我国对液体粪肥适宜用量、施肥方式、施肥季节等的研究还相对缺乏。郭海刚等^[27]的研究显示,在冬小麦越冬期、拔节期和灌浆期施用粪水,冬小麦产量可比农民习惯施肥提高4.61%~6.63%。杜会英等^[28]的研究表明,冬小麦-夏玉米轮作体系粪水适宜氮带入量为160~240 kg·hm⁻²。

3 粪肥还田对土壤环境及温室气体排放的影响

3.1 粪肥还田对土壤有机质的影响

土壤有机质是土壤理化性质的重要组成部分,粪肥施用可提高土壤有机质含量,增强土壤碳的固持。KHALIQ等^[29]的研究表明,有机与无机肥配合施用能提高土壤有机质含量3%~9%。徐明岗等^[30]通过41个长期定位施肥试验发现,没有施用粪肥的土壤,有机质平均减少约10%,而施用粪肥配施钾肥的土壤有机质基本能保持平衡甚至略有增加。粪肥施用时间越长,土壤有机质提高幅度越大。施用粪肥有机肥30 a,西北地区和华北地区土壤有机质含量平均增加51%和68%,南方旱地和长江流域水田土壤有机质含量平均增加24%^[31]。粪肥施用可增加土壤团聚体的稳定性,加强对碳基的保护作用,从而提升土壤碳的

固存^[32]。JIANG等^[33]的研究表明,长期施用粪肥可显著增加土壤有机碳的总含量以及增强大团聚体中土壤有机碳的转化。HUANG等^[34]研究发现,连续27 a施用粪肥的稻田土壤总有机碳可提高25.5%。除增加土壤有机质的总量外,粪肥施用还能优化土壤腐殖质组成,即增加胡敏酸(HA)的含量,提升胡敏酸/富里酸(FA)的比例^[35-36]。

3.2 粪肥还田对土壤氮磷养分的影响

粪肥还田可显著提高土壤氮磷养分含量。温廷臣等^[37]的研究表明,与单施化肥相比,长期施用有机肥及有机/无机肥配施(50%化肥+50%有机肥),土壤剖面(0~40 cm)全氮含量分别增加79.6%和30.1%,碱解氮含量分别增加50.5%和3.9%;土壤剖面(0~60 cm)有效磷含量约是单施化肥的7.2倍和3.3倍。颜雄等^[38]的研究也证明,有机无机肥配施处理使土壤的全氮提高了68.5%,同时明显提高了土壤全磷含量。粪肥还田对土壤氮磷养分含量影响与粪肥投入量相关。YANG等^[39]通过长期定位试验,证实单施化肥、粪肥有机肥或有机无机肥配施能显著增加土壤全氮,且随着有机肥投入比例的增加,土壤全氮呈增加趋势。施用有机肥也可提高土壤中速效养分含量,改善土壤地力。张鑫等^[40]的研究结果表明,与常规施肥相比,施用有机肥土壤碱解氮增加了9.82%,有效磷增加了19.60%。秦海娟等^[41]研究发现,与常规施用化肥处理相比,施用粪肥有机肥处理的土壤碱解氮和速效磷含量分别显著提高27.8%和21.2%。HARTL等^[42]的研究结果显示,施用堆肥5 a后土壤速效钾含量比不施堆肥平均增加26%。

3.3 粪肥还田对土壤微生物的影响

土壤中的微生物数量庞大、种类繁多,是丰富的微生物资源库^[43],被称为地球关键元素循环过程的“引擎”^[44]。土壤中有有机质的分解与积累、氮素转化及温室气体排放等重要过程都与微生物的活动密切相关。CUI等^[45]的研究表明,粪肥的合理施用能够提升土壤有机质含量,增加土壤微生物的生物多样性。长期平衡施用粪肥和化肥不仅可以增加有机物质库和养分利用率,还可以增强根际细菌群落的生物多样性和放线菌的丰度,有助于农业生态系统的可持续发展。与无机肥相比,长期施用粪肥能够提高土壤微生物多样性,且不同施肥类型导致表层土壤微生物的碳水化合物和氨基酸代谢图谱产生变化^[46],而且进一步影响了耕层(20~40 cm)下土壤的微生物活性^[47]。XU等^[25]的研究表明,施用中等浓度的沼液(165.1 t·hm⁻²)

能够提高水稻和油菜产量、土壤肥力和细菌多样性。然而也有研究表明,在华北平原小麦玉米轮作农田中长期施用猪场粪肥,虽然显著提高了氨氧化细菌丰度,但由于硝化速率加快导致土壤氮素淋失风险增加^[48]。利用奶牛粪污厌氧发酵后的沼液灌溉稻田,随着年限的增加,土壤微生物群落的物种丰富度和多样性逐渐降低^[49]。

3.4 粪肥还田对土壤重金属的影响

粪肥还田是农田土壤重金属污染的重要来源,长期施用粪肥,土壤中的重金属含量呈累积升高趋势^[50]。有研究显示,长期施用猪粪的土壤中Cu、Zn和As的含量分别为不施用猪粪土壤的11、5倍和2倍^[51]。朱奇宏等^[52]对太湖周边地区的蔬菜基地土壤的调查发现,施用猪粪肥后的土壤中Cu等重金属的含量是背景值的2倍。不同粪便来源的粪肥施用后重金属含量具有明显差异,NICHOLSON等^[53]调查了英格兰和威尔士农田中重金属的来源,发现土壤中的Zn和Cu有30%来自畜禽粪肥,其中大部分来自施用量较大的牛粪。长期使用粪肥产生的累积效应极有可能使土壤中重金属的含量超过国家标准。如杨乐等^[54]在新疆伊宁用猪场沼液灌溉蔬菜的试验中发现,连续5 a施用沼液的土壤中Cd、Cu和Se已出现超标现象。刘向林等^[55]在山东烟台的鸡粪沼液8 a灌溉试验中发现,玉米种植土壤中Pb、As和Cd的超标率约为33%。黄治平等^[56]的研究发现,连续以 $150\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施用量施用猪粪于蔬菜温室中,土壤中全Cu和全Zn含量可能分别经过10 a和15 a将会超过国家农田土壤二级标准。

3.5 粪肥还田对农田土壤抗生素和抗性基因的影响

畜禽粪肥是环境中抗生素残留和抗性基因的主要来源之一,国内外诸多研究均表明,粪肥还田可增加土壤中抗生素残留和抗性基因丰度。国内学者阮蓉等^[57]以天津市蓟州区20个不同类型家庭农场为对象,对比了施用和未施用粪肥土壤中抗生素残留情况,结果显示,鸡场、猪场和牛场施粪土中抗生素总浓度分别到达 $1\,291.06$ 、 $423.48\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $22.48\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是未施粪土的12.6、35.9倍和9.7倍,且四环素类(TCs)浓度最高,喹诺酮类(FQs)次之(图1)。有研究显示,连续6 a施用沼肥的土壤中抗生素类兽药残留检出率为42%,其中四环素类和喹诺酮类抗生素残留量分别可达到 $3.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $14.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均远超过国际兽药协调委员会(VICH)规定的土壤中抗生素残留允许限量($0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),表明沼液还田存在土壤抗

生素污染风险^[58]。对于抗性基因(ARGs)亦是如此,国内学者谷艳茹等^[59]研究发现畜禽粪肥施用可显著增加土壤环境中ARGs的丰度,其中鸡粪肥的施用对土壤ARGs影响最大,其相对丰度增加了18倍,而施加猪粪肥和牛粪肥亦使其分别增加了14倍和8倍。国外研究也表明,粪肥使用会增加土壤中抗生素和抗性基因丰度。例如,MARTI等^[60]在施用猪粪的土壤与其上生长的蔬菜中都检测到多种ARGs。另有研究表明,粪肥还田增加了土壤中大环内酯-林可酰胺-链霉菌素B(MLSs)、四环素类、氨基糖苷类、 β -内酰胺类、多重耐药类ARGs的污染多样性^[61],其中多重耐药基因、氨基糖苷类、 β -内酰胺酶和MLSs类耐药基因丰度水平增加显著^[62]。由此可见,限制抗生素在畜禽养殖业中的过量使用非常必要,瑞典和欧盟分别于1986年和2006年禁止动物饲料中使用抗生素作为生长促进剂^[63],我国从2015年开始禁止抗生素作为饲料添加剂,2020年7月开始,企业停止生产含有抗生素生长促进剂的商业饲料^[64]。随着抗生素源头使用量的减少,粪肥使用带来的土壤污染亦会有所缓减。

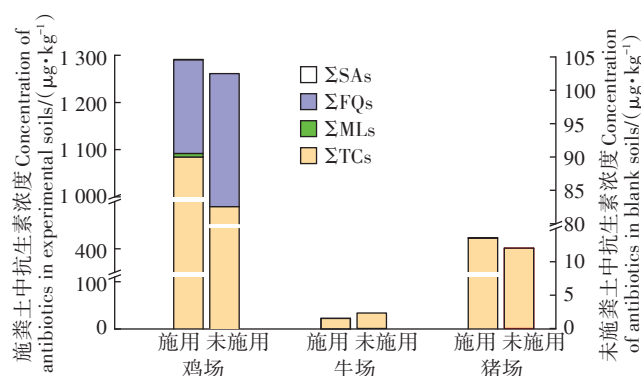


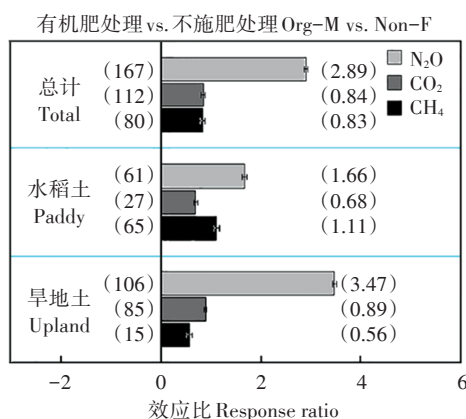
图1 不同养殖粪肥施用后土壤中抗生素总浓度

Figure 1 Total concentration of antibiotics in soil after application of livestock and poultry manure

3.6 粪肥还田对土壤温室气体排放的影响

粪肥还田对土壤温室气体排放具有较大影响。施用粪肥可增加土壤有机碳含量,改变土壤碳氮比,进而影响农田土壤温室气体的排放^[65]。REN等^[66]的研究表明,与不施肥处理相比,施用粪肥能显著增加农田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放(图2)。粪肥能够改善土壤结构及土壤孔隙度,增强微生物活性,促进土壤有机质的分解,进而促进土壤 CO_2 的排放^[67]。与不施肥处理相比,施用有机肥后土壤 CO_2 的排放量可增加1.6倍^[68]。粪肥还田为土壤产甲烷菌提供了丰富的产甲

烷基质,同时通过改善土壤理化性质,为产甲烷菌和甲烷氧化菌的生长提供适宜的环境条件,进而促进 CH_4 排放。张黛静等^[69]的研究表明,在华北平原小麦-玉米周年中,增施有机肥比单施化肥土壤 CH_4 排放增加了83%。有机肥通过调节土壤碳氮比影响土壤微生物活性,直接或间接影响 N_2O 排放。黄容等^[70]和王聪等^[71]研究发现,与常规施用化肥处理相比,粪肥配施化肥显著增加了土壤 N_2O 排放量。不同的农田利用方式也会影响 N_2O 排放。在水稻土壤中,与单施化肥相比,粪肥施用或粪肥化肥配施可分别降低水稻土24%和7%的 N_2O 排放量。而在旱地土壤中,粪肥全替代处理可降低 N_2O 排放,但粪肥配施化肥处理增加了土壤 N_2O 排放量^[66]。与固体有机肥相比,沼液和养殖肥水中有有机碳和铵的可利用性更高,施用后增加了土壤微生物对氧气的消耗,导致更高的 N_2O 排放量^[72-73]。



左侧括号中数字代表Meta分析样本数量,右侧括号中数字代表与不施肥相比,施用有机肥后温室气体排放量增加倍数

Numbers near the bars at the positive side of x axis are the weighted response ratio and the numbers at the negative side of x axis are the numbers of comparisons

图2 有机肥施用对土壤温室气体排放的影响^[66]

Figure 2 N_2O , CO_2 and CH_4 emissions affected by manure application compared to non-fertilizer

4 粪肥还田机械设备

施肥设备不仅影响施肥效率,而且影响肥料利用率。随着农业现代化程度的提高和农村劳动力的转移,对施肥机械化的需求越来越高。与化肥施用设备相比,粪肥施用设备的研究和推广相对落后,根据粪肥的物理形态,施用设备可分为固体撒施设备和液体施用设备^[74]。

4.1 固体撒施设备

固体撒施机根据动力驱动方式、输肥方式以及撒

肥方式的不同而具有多种类型。目前,欧美等发达国家的固体粪肥撒施设备已达到较高技术水平,常见的撒施装备有离心圆盘式、桨叶式与锤片式撒肥装置^[75]。离心圆盘式撒施机械利用撒肥盘高速旋转产生的离心力对肥料进行抛撒,该种机型具有较大的工作幅宽,适用于流动性较好的颗粒有机肥料,如德国ZA-M系列施肥机施肥幅宽范围为10~36 m,可通过智能平台调控施肥量;但该类撒施机工作时肥料纵向与横向抛撒不均匀,需通过重叠作业加以改善^[76-77]。桨叶式撒施机普遍体积庞大,载肥量大,工作效率高,适用于平原大农场作业,肥料经由抛撒桨叶的高速旋转实现破碎以及向后抛撒,具有较大的肥料抛撒幅宽,与离心圆盘式施肥机相似,肥料抛撒在纵、横向分布不均匀^[78]。锤片式撒施机大多为侧式抛撒,对粪肥的种类与含量适应性较好,如法国库恩公司ProTwin系列锤片式撒施机(图3),具有双搅龙输肥装置,抛撒装置由锤片构成,粪肥被锤片快速抽打后,实现破碎、均匀抛撒,但功耗较高^[79-80]。

近年来,我国用于固体粪肥施用的机械设备研发取得较快进展。吴爱兵等^[81]研制的螺杆式施肥机可撒施高含水率、高含杂率的有机肥,适用范围广;山东天盛机械科技股份有限公司与农业农村部南京农业



图3 法国库恩公司有机肥侧抛机

Figure 3 Kuhn organic fertilizer side thrower from French



图4 我国LDFC-2.6履带式撒肥机

Figure 4 LDFC-2.6 crawler manure spreader from China

机械化研究所联合研发的LDFC-2.6履带式撒肥机(图4),撒肥幅宽4~8 m,容积2.6 m³,适合水田、大棚、果园及大田等工作环境。郝延杰等^[82]研发的精准有机肥施肥机可精准调节施肥量和幅宽,同时可对料箱与施肥情况进行实时监控。

4.2 液体施用设备

液体有机肥施肥机主要由罐体、抽吸装置、洒施装置和行走系统构成,工作方式分为地表喷洒和深施,基本工作原理为肥料罐经充气加压后,液肥经由总管、分配器均匀稳定分配至各分管,喷洒于地表或深施至合适土层^[83]。地表喷洒式液体施肥机的施肥装置为喷枪或喷头,液体有机肥经由喷枪或喷头喷洒至地面,该施肥机结构简单、工作阻力小,作业效率高,但存在喷洒不均匀、重施、漏施现象。美国凯斯“爱国者”3230型液体施肥机,喷洒控制采用凯斯专利技术,降低了作业过程中漂移和后滴效果,可保持恒定的喷洒压力,适合大药量高速作业^[84]。深施式液体施肥机是将有机肥直接注入到土壤中,使农作物地下根系可充分吸收养料,降低了液体肥的挥发和流失,同时减少对环境 的污染,但对机械设备要求较高,如美国约翰迪尔公司的2510L型液体施肥机,其作业幅宽可达20 m,施肥深度可达508 mm^[85]。为应对日益严格的环境保护政策,提高液体粪肥机械还田效率,德国荷马(Holmer)机械制造有限公司开发了系列自走式粪肥还田机械,与牵引式设备相比机动性能更强,田间工作时速达到32 km·h⁻¹,一体化轻量化设计避免土地压实,而且可配备不同的施肥装置,进行托管式或注入式施肥(图5)。拖管式还田装备通过拖管将储存在田间地头的沼液池/粪污池中的有机液肥输送至施肥机具中进行洒施还田,根据挂载的施肥机具,可直接喷洒,也可浅/深施(图6)。该还田方式不需配备罐车,无需考虑罐车防腐、压力保险等问题,但作业距离受限,拖管滑动易损伤植被。



图5 德国 Holmer 液体粪肥还田机械

Figure 5 Holmer slurry returning machine from Germany



图6 北爱尔兰 SlurryKat 公司液体粪肥施用设备

Figure 6 SlurryKat slurry returning equipment of Northern Ireland

与发达国家相比,我国液体粪肥洒施设备研发还处于起步阶段。如北京国科诚泰农牧设备有限公司研发了SP、FLEX 系列浅/深施式液肥还田机械(图7),容积9~23 m³,施肥幅宽12~24 m;董和银等^[86]研制的9YPE-10型液态肥施肥机由拖拉机牵引行进,使用真空泵作为动力驱动,可进行液态肥的自动吸取和机械化撒施作业;李文哲等^[87]研究设计了沼液沼渣暗灌施肥机,使用脉冲式分配器,降低了出口处的堵塞现象,具有较好的田间施肥质量。但总体上,我国液体有机肥施肥装置主要是从国外进口,设备的研发和制造尚处于引进消化吸收阶段,成熟的产品较少,液体施肥机的研发还有很大的发展空间。



图7 北京国科诚泰农牧设备有限公司液肥还田机

Figure 7 Liquid fertilizer returning machine from China

5 建议

(1)加强粪肥还田技术创新。粪肥还田利用相关研究应用技术多、基础理论少,单项技术多、集成模式少。面对绿色发展新形势、新任务、新要求,亟需深刻阐明畜禽粪肥生命周期养分流动与机理机制,突破粪肥科学还田、养分高效利用技术瓶颈,制定适应不同区域粪肥还田利用整体方案,为农业绿色发展提供技术支撑。

(2)完善粪肥还田利用监测体系。加强养殖粪肥中营养元素、主要污染物监测、监控技术设备研发,构建涵盖养殖舍内、场区、农田等不同尺度的粪污/粪肥

收集、储存、运输、利用各环节监测体系,建立大数据库,指导粪肥科学利用。

(3)重视粪肥还田的环境与安全风险。重金属、抗生素、抗性基因是畜禽养殖粪肥中普遍存在的典型污染物,其还田利用可能造成的风险应得到足够的重视。特别是与固体粪肥相比,液体粪肥产生量大、储存运输难,长期且超量施用现象较普遍,更应对由此产生的土壤、地下水、农产品的环境污染和农产品安全等风险进行科学评估。

(4)创新粪肥还田补贴与绿色认证机制。出台畜禽粪肥还田利用补贴政策,如建立耕地地力补贴与粪肥还田利用挂钩机制(按照养分平衡要求施用粪肥可获得补贴),探索建立种养循环农产品品牌认证制度,实现农产品优质优价。

致谢:在论文撰写过程中,得到了支苏丽、杨凤霞、高文萱、丁永祯、王风和常兴平等的大力支持。

参考文献:

- [1] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1462-1479. NIU X S, JU X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1462-1479.
- [2] 董红敏, 左玲玲, 魏莎, 等. 建立畜禽废弃物养分管理制度 促进种养结合绿色发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 180-189. DONG H M, ZUO L L, WEI S, et al. Establish manure nutrient management plan to promote green development of integrated crop-livestock production system[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(2): 180-189.
- [3] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[EB/OL]. (2017-05-31)[2021-08-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm. General Office of the State Council. Opinions of The General Office of the State Council on accelerating the resource utilization of livestock and poultry breeding wastes[EB/OL]. (2017-05-31)[2021-08-20]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-06/12/content_5201790.htm.
- [4] 农业农村部. 农业部办公厅关于印发《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》的通知[EB/OL]. (2018-01-22)[2021-08-20]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice of the General Office of the Ministry of Agriculture on the issuance of *Technical guide for calculating bearing capacity of land contaminated by livestock and poultry manure*[EB/OL]. (2018-01-22)[2021-08-20]. http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tfw/201801/t20180122_6135486.htm.
- [5] 农业农村部, 生态环境部. 农业部办公厅、生态环境部办公厅《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》[EB/OL]. (2020-06-17)[2021-08-20]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202006/t20200617_6346644.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Ecology and Environment. Ministry of Agriculture
- general Office, Ministry of Ecology and Environment General Office *Notice on further clarifying requirements for returning livestock and poultry manure to fields and strengthening supervision of breeding pollution*[EB/OL]. (2020-06-17)[2021-08-20]. http://www.moa.gov.cn/xw/bmdt/202006/t20200617_6346644.htm.
- [6] 田镇重, 郭洪海, 姚利, 等. 中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊1): 123-131. TIAN S Z, GUO H H, YAO L, et al. Development analysis for fertilizer utilization of agricultural planting and animal wastes in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(Suppl 1): 123-131.
- [7] 周继豪, 沈小东, 张平, 等. 基于好氧堆肥的有机固体废物资源化研究进展[J]. 化学与生物工程, 2017, 34(2): 13-18. ZHOU J H, SHEN X D, ZHANG P, et al. Research progress on recycling of organic solid wastes based on aerobic compost[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2017, 34(2): 13-18.
- [8] 吴建富, 卢志红, 胡丹丹, 等. 科学认识有机肥料在农业生产中的作用[J]. 作物杂志, 2017(5): 1-6. WU J F, LU Z H, HU D D, et al. Scientifically understanding the role of organic fertilizer in agricultural production[J]. *Crops*, 2017(5): 1-6.
- [9] 农业农村部. 畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020年)[EB/OL]. (2017-07-07)[2021-08-20]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm. Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Action plan for utilization of livestock and poultry waste resources (2017—2020) [EB/OL]. (2017-07-07)[2021-08-20]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm.
- [10] GERBER P J, UWIZEYE A, SCHULTE R, et al. Nutrient use efficiency: A valuable approach to benchmark the sustainability of nutrient use in global livestock production?[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 9/10: 122-130.
- [11] 陶秀萍, 董红敏. 畜禽废弃物无害化处理与资源化利用技术研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017(1): 43-48. TAO X P, DONG H M. Research progress on animal waste treatment and recycling technology[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017(1): 43-48.
- [12] WEBB J, PAIN B, BITTMAN S, et al. The impacts of manure application methods on emissions of ammonia, nitrous oxide and on crop response: A review[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 137(1): 39-46.
- [13] SHEPHERD M, GIBBS P, PHILIPPS L. Managing manure on organic farms[R]. Mansfield and Newbury: ADAS Gleadthorpe Research Centre and Elm Farm Research Centre, 2002.
- [14] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3231-3239. LI Y B, LI P, WANG S H, et al. Effects of organic fertilizer application in rice-wheat rotation system on crop yield and soil properties: A meta-analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(9): 3231-3239.
- [15] 张文学, 王少先, 刘增兵, 等. 基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 777-790. ZHANG W X, WANG S X, LIU Z B, et al. Evaluating soil fertility improvement effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizers in a red paddy soil using the soil

- fertility index[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5):777-790.
- [16] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4):407-418. ZOU W X, QIU C, HAN X Z, et al. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4):407-418.
- [17] 曹云, 黄红英, 吴华山, 等. 畜禽粪便超高温堆肥产物理化性质及其对小白菜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12):251-257. CAO Y, HUANG H Y, WU H S, et al. Physico-chemical properties of hyperthermophilic composting from livestock manures and its effects on growth of Chinese cabbage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(12):251-257.
- [18] SMITH K A, WILLIAMS A G, NICHOLSON F. Production and management of cattle manure in the UK and implications for land application practice[J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32:73-82.
- [19] FRANCISCO C, LOSS A, BRUNETTO G, et al. Aggregation, carbon, nitrogen, and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in soils under no-tillage system fertilized with injection and surface application of pig slurry for five years[J]. *Carbon Management*, 2021, 12(2):1-22.
- [20] SAUNDERS O E, FORTUNA A M, HARRISON J H, et al. Comparison of raw dairy manure slurry and anaerobically digested slurry as N sources for grass forage production[J]. *International Journal of Agronomy*, 2014, 2012:1-10.
- [21] VALENCIA-GICA R B, YOST R S, PORTER G. Biomass production and nutrient removal by tropical grasses subsurface drip-irrigated with dairy effluent[J]. *Grass and Forage Science*, 2012, 67(3):337-349.
- [22] HUERTAS J, CUEVAS J G, PAULINO L, et al. Dairy slurry application to grasslands and groundwater quality in a volcanic soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 16:745-762.
- [23] TIECHER T L, LOURENZI C R, GIOTTO E, et al. Phosphorus forms leached in a sandy typic hapludalf soil under no-tillage with successive pig slurry applications[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 242:106406.
- [24] LOSS A, LOURENZI C R, SANTOS E D, et al. Carbon, nitrogen and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in biogenic and physcogenic aggregates in a soil with 10 years of pig manure application[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 166:52-58.
- [25] XU M, XIAN Y, WU J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5):2534-2542.
- [26] DU H, GAO W, LI J, et al. Effects of digested biogas slurry application mixed with irrigation water on nitrate leaching during wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213:882-893.
- [27] 郭海刚, 社会英, 王凤, 等. 规模化牛场废水灌溉对土壤水分和冬小麦产量品质的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(8):1498-1502. GUO H G, DU H Y, WANG F, et al. Effects of dairy wastewater irrigation on soil water and the yield and quality of winter wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(8):1498-1502.
- [28] 社会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):159-165. DU H Y, FENG J, GUO H G, et al. Effects of dairy effluents irrigation on N balance in soil under winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3):159-165.
- [29] KHALIQ A, ABBASI M K. Improvements in the physical and chemical characteristics of degraded soils supplemented with organic-inorganic amendments in the Himalayan region of Kashmir, Pakistan[J]. *Catena*, 2015, 126:209-219.
- [30] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变[M]. 二版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. XU M G, ZHANG W J, HUANG S M, et al. Evolution of soil fertility in China[M]. 2nd Edition. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015.
- [31] 张淑香, 张文菊, 沈仁芳, 等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. 植物营养与肥科学报, 2015, 21(6):1389-1393. ZHANG S X, ZHANG W J, SHEN R F, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6):1389-1393.
- [32] JASTROW J D, AMONETTE J E, BAILEY V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(1/2):5-23.
- [33] JIANG H, HAN X, ZOU W, et al. Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 268:133-143.
- [34] HUANG S, RUI W, PENG X, et al. Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86(1):153-160.
- [35] MENŠÍK L, HLISNIKOVSÝ L, POSPŠILOVÁ L, et al. The effect of application of organic manures and mineral fertilizers on the state of soil organic matter and nutrients in the long-term field experiment[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(8):2813-2822.
- [36] SONG X Y, LIU S T, LIU Q H, et al. Carbon sequestration in soil humic substances under long-term fertilization in a wheat-maize system from north China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):562-569.
- [37] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7):91-99. WEN Y C, LI Y Q, YUAN L, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in north China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(7):91-99.
- [38] 颜雄, 彭新华, 张杨珠, 等. 长期施肥对红壤性水稻土理化性质的影响及土壤肥力质量评价[J]. 湖南农业科学, 2015(3):49-52. YAN X, PENG X H, ZHANG Y Z, et al. Basic physical and chemical properties and assessment for soil fertility quality of paddy soil under long-term fertilization[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2015(3):49-52.
- [39] YANG X, REN W, SUN B, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*, 2012, 177-178:49-56.
- [40] 张鑫, 牛世伟, 叶鑫, 等. 不同施肥处理对辽北春玉米土壤理化性质及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(9):2013-2017. ZHANG X, NIU S W, YE X, et al. Effects of different fertilization

- treatments on soil physicochemical properties and spring maize yield in northern Liaoning Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 33(9):2013–2017.
- [41] 秦海娟, 颌建明, 李静, 等. 不同施肥模式对蒜苗生长及土壤性状的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(5):47–55. QIN H J, XIE J M, LI J, et al. Effects of different fertilization modes on growth and soil properties of green garlic[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2020, 55(5):47–55.
- [42] HARTL W, PUTZ B, ERHART E. Influence of rates and timing of biowaste compost application on rye yield and soil nitrate levels[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2003, 39(3):129–139.
- [43] TECON R, OR D. Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2017, 41(5):599–623.
- [44] 朱永官, 沈仁芳, 贺纪正, 等. 中国土壤微生物组: 进展与展望[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(6):554–565, 542. ZHU Y G, SHEN R F, HE J Z, et al. China soil microbiome initiative: Progress and perspective[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(6):554–565, 542.
- [45] CUI X, ZHANG Y, GAO J, et al. Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of Central South China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):16554.
- [46] SRADNICK A, MURUGAN R, OLTMANNS M, et al. Changes in functional diversity of the soil microbial community in a heterogeneous sandy soil after long-term fertilization with cattle manure and mineral fertilizer[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 63:23–28.
- [47] 郭莹, 王一鸣, 巫攀, 等. 长期施用粪肥对水稻土中微生物群落功能多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(3):593–602. GUO Y, WANG Y M, WU P, et al. Influence of long-term manure application in paddy soil on the functional diversity of microbial community[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019, 25(3):593–602.
- [48] 盖霞普. 华北平原不同有机物料投入对农田碳氮协同转化及环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019:79. GAI X P. Effects of input of different organic materials on co-transformation of carbon and nitrogen and environment in farmland in North China Plain[D]. Beijing: Chinese academy of Agricultural Sciences, 2019:79.
- [49] 朱金山, 张慧, 马连杰, 等. 不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析[J]. 环境科学, 2018, 39(5):2400–2411. ZHU J S, ZHANG H, MA L J, et al. Diversity of the microbial community in rice paddy soil with biogas slurry irrigation analyzed by illumina sequencing technology[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5):2400–2411.
- [50] 董占荣. 猪粪中的重金属对菜园土壤和蔬菜重金属积累的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2006:10. DONG Z R. Effects of swine manure-born heavy metals on accumulation of heavy metals in vegetable soil and vegetables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006:10.
- [51] 王瑾, 韩剑众. 饲料中重金属和抗生素对土壤和蔬菜的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4):90–93. WANG J, HAN J Z. Effects of heavy metals and antibiotics on soil and vegetables[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2008, 24(4):90–93.
- [52] 朱奇宏, 黄道友, 樊睿, 等. 环洞庭湖区典型蔬菜基地土壤重金属污染状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊1):22–26. ZHU Q H, HUANG D Y, FAN R, et al. Pollution status of heavy metals in soils of typical vegetable bases around Dongting Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl 1):22–26.
- [53] NICHOLSON F A, SMITH S R, ALLOWAY B J, et al. Quantifying heavy metal inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Water and Environment Journal*, 2006, 20(2):87–95.
- [54] 杨乐, 王开勇, 庞玮, 等. 新疆绿洲区连续五年施用沼液对农田土壤质量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(5):17–21. YANG L, WANG K Y, PANG W, et al. Effect of biogas slurry on soil quality of intensive plantation field in Xinjiang oasis for 5 years[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(5):17–21.
- [55] 刘向林, 王丽霞, 吴冬悦, 等. 长期施用沼液对土壤及产品的影响[J]. 中国沼气, 2018, 36(2):87–91. LIU X L, WANG L X, WU D Y, et al. Effects of long-term application of biogas slurry on soil and products[J]. *China Biogas*, 2018, 36(2):87–91.
- [56] 黄治平, 徐斌, 张克强, 等. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. 农业工程学报, 2007(11):239–244. HUANG Z P, XU B, ZHANG K Q, et al. Accumulation of heavy metals in the four years' continual swine manure-applied greenhouse soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007(11):239–244.
- [57] 阮蓉, 张克强, 杜连柱, 等. 天津市家庭养殖环境中抗生素污染特征与风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1):202–210. RUAN R, ZHANG K Q, DU L Z, et al. Pollution characteristics and risk assessment of antibiotics in a family farm breeding environment in Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1):202–210.
- [58] 王小彬, 闫湘, 李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农用之环境安全风险[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1):110–139. WANG X B, YAN X, LI X Y. Environmental safety risk for application of anaerobic fermentation biogas slurry from livestock manure in agricultural land in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1):110–139.
- [59] 谷艳茹, 韩秉君, 黄继元, 等. 天津市家庭农场养殖粪污耐药基因赋存特征及风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2):394–402. GU Y R, HAN B J, HUANG J Y, et al. Occurrence characteristics and risk assessment of resistance genes in livestock waste from family farms in Tianjin City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2):394–402.
- [60] MARTI R, SCOTT A, TIEN Y C, et al. Impact of manure fertilization on the abundance of antibiotic-resistant bacteria and frequency of detection of antibiotic resistance genes in soil and on vegetables at harvest[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(18):5701–5709.
- [61] BARRIOS R E, BARTELT-HUNT S L, LI Y, et al. Modeling the vertical transport of antibiotic resistance genes in agricultural soils following manure application[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285:117480.
- [62] FATOBA D O, ABIA A, AMOAKO D G, et al. Rethinking manure application: Increase in multidrug-resistant *Enterococcus* spp. in agricultural soil following chicken litter application[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(5):885.
- [63] HAMID H, ZHAO L H, MA G Y, et al. Evaluation of the overall impact of antibiotics growth promoters on broiler health and productivity during the medication and withdrawal period[J]. *Poultry Science*,

- 2019, 98(9):3685-3694.
- [64] ZHI S, SHEN S, ZHOU J, et al. Systematic analysis of occurrence, density and ecological risks of 45 veterinary antibiotics: Focused on family livestock farms in Erhai Lake basin, Yunnan, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 267:115539.
- [65] 沈仕洲, 王凤, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6):1-8. SHEN S Z, WANG F, XUE C L, et al. Research advances on effect of organic fertilizer on farmland greenhouse gas emissions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(6):1-8.
- [66] REN F, ZHANG X, LIU J, et al. A synthetic analysis of greenhouse gas emissions from manure amended agricultural soils in China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):8123.
- [67] WASSMANN R, NEUE H U, LADHA J K, et al. Mitigating greenhouse gas emissions from rice-wheat cropping systems in Asia[J]. *Environment Development and Sustainability*, 2004, 6(1/2):65-90.
- [68] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤CO₂和N₂O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):913-918. DONG Y H, OUYANG Z, LI Y S, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):913-918.
- [69] 张黛静, 宗洁静, 马建辉, 等. 小麦-玉米周年耕作方式与增施有机肥对夏玉米土壤有机碳库及温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10):1927-1935. ZHANG D J, ZONG J J, MA J H, et al. Effects of wheat-maize rotation system tillage method and enhanced organic fertilizer on soil organic carbon pool and greenhouse gas emission in maize soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(10):1927-1935.
- [70] 黄容, 高明, 黎嘉成, 等. 有机物料等氮量施用对紫色土氮形态及温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21):86-100. HUANG R, GAO M, LI J C, et al. Effects of combined application of various organic materials and chemical fertilizer on soil nitrogen formation and greenhouse gas emission under equal nitrogen rates from purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(21):86-100.
- [71] 王聪, 沈健林, 郑亮, 等. 猪粪肥配施对双季稻田CH₄和N₂O排放及其全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(8):3120-3127. WANG C, SHEN J L, ZHENG L, et al. Effects of combined applications of pig manure and chemical fertilizers on CH₄ and N₂O emissions and their global warming potentials in paddy fields with double-rice cropping[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(8):3120-3127.
- [72] JÄGER N, STANGE C F, LUDWIG B, et al. Emission rates of N₂O and CO₂ from soils with different organic matter content from three long-term fertilization experiments: A laboratory study[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(5):483-494.
- [73] JÄGER N, DUFFNER A, LUDWIG B, et al. Effect of fertilization history on short-term emission of CO₂ and N₂O after the application of different N fertilizers—a laboratory study[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59(2):161-171.
- [74] 李俊卫, 宁宗拔, 陈冲, 等. 规模化猪场粪尿转化为粪肥及还田工艺介绍[J]. 今日养猪业, 2018(1):102-104. LI J W, NING Z B, CHEN C, et al. Introduction to the technology of converting pig manure and urine into manure and returning it to the field[J]. *Pigs Today*, 2018(1):102-104.
- [75] MICLET D, PIRON E, VENEL S, et al. Mass flow control for manure spreader[C]. France: International Conference on Agricultural Engineering, 2010.
- [76] 孙冬霞, 李明军, 吴爱兵, 等. 有机肥及其配套机械化技术的研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(2):72-80. SUN D X, LI M J, WU A B, et al. Research progress of organic fertilizer and its supporting mechanization technology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(2):72-80.
- [77] 吕金庆, 尚琴琴, 杨颖, 等. 锥盘式撒肥装置的性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11):16-24. LÜ J Q, SHANG Q Q, YANG Y, et al. Performance analysis and experiment on granular fertilizer spreader with cone disc[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(11):16-24.
- [78] 周斌. 尾部背推式撒肥机[J]. 农业机械, 2010(1):72. ZHOU B. Rear back push spreader[J]. *Farm Machinery*, 2010(1):72.
- [79] 周斌. 库恩侧式抛撒机[J]. 农业机械, 2010(30):106. ZHOU B. Kuhn side spreader[J]. *Farm Machinery*, 2010(30):106.
- [80] 王庆庆. 农家肥抛撒机抛撒特性分析及试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. WANG Q Q. Throwing characteristics analysis and experimental research of farm manure spreader[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [81] 吴爱兵, 朱德文, 陈永生, 等. 螺杆式有机肥施肥机的研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6):174-176, 162. WU A B, ZHU D W, CHEN Y S, et al. Design and test of organic manure fertilizer machine[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(6):174-176, 162.
- [82] 郝延杰, 王成, 吴爱兵, 等. 精准有机肥施肥机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2021, 43(3):87-94. HAO Y J, WANG C, WU A B, et al. Design and test of precise organic fertilizer applicator[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(3):87-94.
- [83] 张鲁云, 何义川, 杨怀君, 等. 液体施肥机械发展现状与现代农业关系分析[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4):34-40. ZHANG L Y, HE Y C, YANG H J, et al. Analysis of the relationship between the development of liquid fertilizer machinery and modern agriculture[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(4):34-40.
- [84] 高效的凯斯“爱国者”液体施肥机[J]. 现代化农业, 2013(7):55-56. The efficient case patriot liquid fertilizer applicator[J]. *Modernizing Agriculture*, 2013(7):55-56.
- [85] 张鲁云, 何义川, 杨怀君, 等. 国内外液体肥料施肥机械发展概况及需求分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15):12-15, 19. ZHANG L Y, HE Y C, YANG H J, et al. Development and demand analysis of liquid fertilizer machines at home and abroad[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(15):12-15, 19.
- [86] 董和银, 张涛, 滕翔, 等. 9YPE-10型液态肥撒播机的研制[J]. 新疆农机化, 2019(2):5-7. DONG H Y, ZHANG T, TENG X, et al. 9YPE-10 liquid fertilizer thrower[J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2019(2):5-7.
- [87] 李文哲, 袁虎, 刘宏新, 等. 沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):75-80. LI W Z, YUAN H, LIU H X, et al. Biogas slurry fertilizer applicator for dark irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11):75-80.